



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-7-31-39>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК [621.384.64:539.1.089.6]: 615.849.1

## ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ПАЦИЕНТОВ В ПОЛОЖЕНИИ ПРОВЕДЕНИЯ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕДИЦИНСКИХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПАРАМЕТРЫ ДОСТАВЛЯЕМОГО ИМ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТРЕХМЕРНОГО ДОЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

ПЕТКЕВИЧ М.Н.<sup>1</sup>, ТИТОВИЧ Е.В.<sup>2</sup>, БЕЛЬКОВ Г.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГЭИ им. А.Д. Сахарова Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)

<sup>2</sup>УП «АДАНИ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 3 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

**Аннотация.** В результате развития лучевой терапии онкологических заболеваний у врачей – радиационных онкологов появилась возможность прецизионно доставлять индивидуальные дозовые распределения в объем опухоли, максимально снизив дозовые нагрузки на критические органы, находящиеся в непосредственной близости к зоне облучения. Однако для корректного применения таких методов терапии необходимо было ужесточить требования, предъявляемые к технико-дозиметрическим параметрам радиотерапевтического оборудования, точности настройки и калибровки его геометрических, механических и радиационных параметров. Цель работы – определение величины возможной ошибки при позиционировании пациента в положении проведения лучевого лечения с использованием медицинских линейных ускорителей электронов путем моделирования воздействия тела пациента на радиотерапевтический стол (РТС). Для определения величин ошибки авторами рассмотрена конструкция и характеристики типовых РТС, разработана модель «среднего» тела пациента, позволяющая изменять нагрузку на терапевтическую поверхность (ТП) РТС с шагом 1 кг. Определены параметры положения ТП для основных локализаций лучевой терапии злокачественных новообразований: опухолей головного мозга и шеи, опухолей грудной клетки и малого таза. Экспериментально установлены численные величины отклонения ТП в изоцентре радиационного поля от предписанного горизонтального положения при нагрузке на нее от 40 до 180 кг для ТП, используемых в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова. На основании полученных экспериментальных данных показана необходимость проведения коррекции условий облучения пациента на этапе моделирования параметров его лечения для обеспечения требуемой протоколами лучевой терапии точности доставки индивидуальных дозовых распределений, для чего следует провести анализ зависимости отклонений в дозе, доставляемой пациентам, от величины отклонения ТП РТС от горизонтального положения для каждого используемого в клинической практике РТС, а также разработать и внедрить механизм, который позволит учитывать эту информацию при выборе параметров сеанса облучения и предписания дозы для любой локализации злокачественных новообразований.

**Ключевые слова:** линейный ускоритель, радиотерапевтический стол, фантом, величина отклонения.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Петкевич М.Н., Титович Е.В., Бельков Г.В. Влияние точности позиционирования онкологических пациентов в положении проведения лучевой терапии с использованием медицинских линейных ускорителей электронов на параметры доставляемого им индивидуального трехмерного дозового распределения. Доклады БГУИР. 2020; 18(7): 31-39.

## THE EFFECT OF CANCER PATIENTS' POSITIONING ACCURACY DURING RADIATION THERAPY SESSIONS USING MEDICAL LINEAR ELECTRON ACCELERATORS ON THE PARAMETERS OF THEIR INDIVIDUAL 3D DOSE DISTRIBUTION

MAKSIM N. PIATKEVICH<sup>1</sup>, EGOR V. TITOVICH<sup>2</sup>, GEORGE V. BELKOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

<sup>2</sup>*Unitary Enterprise "ADANI" (Minsk, Belarus)*

*Submitted 3 June 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

**Abstract.** Due to the rapid development and further improvement of radiation treatment technologies oncologists have an opportunity to precisely deliver individual dose distributions to the tumor, minimizing the doses obtained by critical organs and healthy structures. For the correct and successful application of these complex methods of radiation therapy, it was necessary to enforce the requirements for the technical and dosimetric parameters of the radiotherapy equipment. The purpose of the research is to determine the magnitude of the possible error for patients' positioning during their radiotherapy treatments using medical linear accelerators by modeling the impact of the patient's body on the treatment couch. To determine the values of a possible error, the authors have considered the design and characteristics of a typical treatment couch, developed a model of the "average" patient's body (phantom), which allowed changing the load to the treatment couch with a step of 1 kg. The position parameters of treatment couches were determined for the main types of localization of radiation therapy for malignant tumors: head and neck tumors, breast tumors and pelvic tumors. Numerical values of the treatment couch deviations from prescribed horizontal position were experimentally established for a load from 40 to 180 kg for a treatment couch used at the N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. Based on the obtained experimental data, the necessity to correct the patient's treatment conditions at the stage of treatment planning were confirmed in order to ensure the delivery accuracy of individual dose distributions as required by the radiation therapy protocols. Authors stated that an analysis of the dependence of the deviations in the dose delivered to the patients on the deviation of the radiotherapy table from its horizontal position should be carried out for each radiotherapy table used in clinical practice. The development and implementation of a mechanism that will allow considering this information when choosing the parameters of the patient's treatment session and prescribing the dose for any localization of malignant neoplasms is needed.

**Keywords:** linear accelerator, treatment couch, phantom, patient's treatment position.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Piatkevich M.N., Titovich E.V., Belkov G.V. The effect of cancer patients' positioning accuracy during radiation therapy sessions using medical linear electron accelerators on the parameters of their individual 3D dose distribution. *Doklady BGUIR*. 2020; 18(7): 31-39.

### Введение

Одной из актуальных проблем современного здравоохранения является проблема борьбы с онкологическими заболеваниями, занимающими второе место после сердечно-сосудистых заболеваний по количеству летальных исходов [1, 2]. В комплексе проводимых в онкологии лечебно-профилактических мероприятий одно из ведущих мест принадлежит лучевой терапии, которая достигла значительных успехов и в современных условиях может быть использована при лечении более 60 % онкологических пациентов [3].

Современные линейные ускорители электронов, используемые в Республике Беларусь, позволяют проводить прецизионное облучение опухолей с минимальной дозовой нагрузкой на окружающие здоровые ткани и органы. Такое лечение требует соблюдения высокой точности

в позиционировании пациента во избежание недооблучения опухоли и переоблучения нормальных тканей [4–5].

Система позиционирования пациента, основным элементом которой является радиотерапевтический стол (РТС), входит в состав каждого терапевтического аппарата лучевой терапии (ЛТ). Конструкционные характеристики РТС, такие как размер, диапазон перемещений по каждой из используемых осей, материал терапевтической поверхности (ТП) стола и др., оказывают непосредственное влияние на точность и качество проведения ЛТ [5]. В работе<sup>1</sup> описан способ проверки горизонтальности ТП (деки) РТС, который позволяет оценить прогиб края стола, выдвинутого до положения изоцентра при нагрузке 70–80 кг на расстоянии 20 см от края. Однако не рассмотренными остаются величины нагрузок, при которых возникают отклонения от горизонтальности ТП РТС, которые могут привести к превышению предельно допустимых отклонений в положении пациента, что повлияет на качество проводимых процедур облучения. В частности, известно, что отклонение данного параметра более чем на 5 мм может повлиять на геометрическую и дозиметрическую точность подведения дозы к опухоли при проведении курса ЛТ [5]. Цель работы – определение величины возможной ошибки при позиционировании пациентов в положении проведения лучевого лечения с использованием медицинских линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) путем моделирования воздействия тела пациента на РТС для трех основных видов локализаций злокачественных новообразований: опухолей головного мозга и шеи, опухолей грудной клетки и опухолей малого таза.

### Методика проведения эксперимента

В настоящее время все современные коммерческие медицинские ЛУЭ оснащены системой позиционирования пациентов, в состав которой входит РТС, органы управления положениями РТС, индикаторы положений РТС, электронный блок обработки сигналов, система автоматической настройки параметров РТС, система аварийного отключения ЛУЭ и другие механизмы и устройства в зависимости от поколения и назначения ЛУЭ. Структурная схема ЛУЭ представлена на рис. 1.

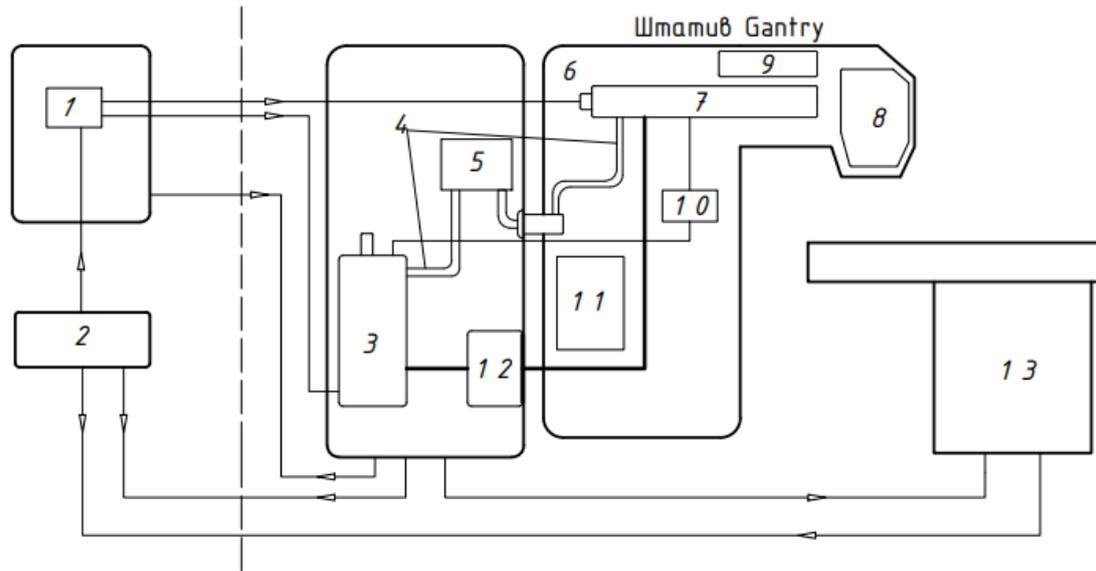
РТС состоит из ТП с двумя и более направлениями движений для укладки пациента и крепления фиксирующих устройств, подъемного механизма, поворотной платформы и разъемов для подключения необходимых периферийных устройств. ТП представляет собой цельную панель из углеродного волокна без металлических вставок, грузоподъемностью до 227 кг, толщиной от 5 до 7,5 см. Такая конструкция РТС позволяет воспроизводить стабильное положение пациента от сеанса к сеансу для реализации современных методов ЛТ, при которых требуется высокая точность.

Терапевтические поверхности различных моделей РТС имеют конструктивные различия даже у одного производителя в зависимости от поколения ЛУЭ и его назначения. К конструктивным различиям относятся толщина ТП, а также геометрическая форма и расположение опорных рельсов в случае их использования.

На примере РТС «Ехаст IGRT» (рис. 2) рассмотрены типовые характеристики системы позиционирования пациентов. РТС имеет четыре направления движения – продольное, поперечное, вертикальное и вращательное вдоль осевой линии пучка (изоцентрическое вращение). Диапазоны движений определены производителем таким образом, чтобы беспрепятственно и безопасно реализовать возможные положения пациента для облучения большинства локализаций.

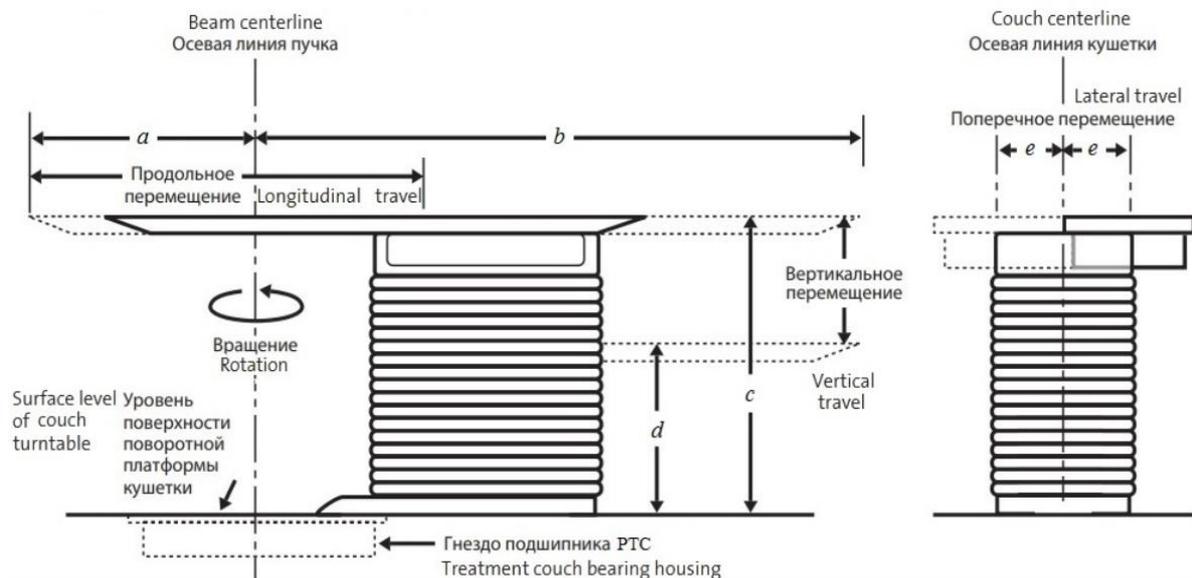
---

<sup>1</sup> Тарутин И.Г., Титович Е.В., Гацкевич Г.В., Жигун А.А. *Методы оценки характеристик лучевого лечения онкологических пациентов при проведении высокотехнологического облучения на медицинских ускорителях электронов*. Инструкция по применению № 037-1-0515. Утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 18.06.2015. Tarutin I.G., Titovich E.V., Gatskevich G.V., Zhigong A.A. [Methods for assessing the characteristics of radiation treatment of cancer patients during high-tech irradiation at medical electron accelerators]. Instructions for use No. 037-1-0515. Approved by the Ministry of Health of the Republic of Belarus 18.06.2015.



**Рис. 1.** Структурная схема линейного ускорителя: 1 – модулятор, 2 – консоль управления, 3 – СВЧ генератор или усилитель, 4 – волновод, 5 – циркулятор, 6 – электронная пушка, 7 – ускорительная секция, 8 – поворотный магнит и устройства формирования радиационного пучка, 9 – система поддержания вакуума, 10 – автоматическая система контроля и подстройки частоты, 11 – пневматическая система, 12 – система водного охлаждения, 13 – РТС [5]

**Fig. 1.** Block diagram of a linear accelerator: 1 – modulator, 2 – control console, 3 – microwave generator or amplifier, 4 – waveguide, 5 – circulator, 6 – electron gun, 7 – accelerator section, 8 – turn magnet and radiation beam forming devices, 9 – vacuum maintenance system, 10 – automatic frequency control and adjustment system, 11 – pneumatic system, 12 – water cooling system, 13 – radiation therapy table [5]

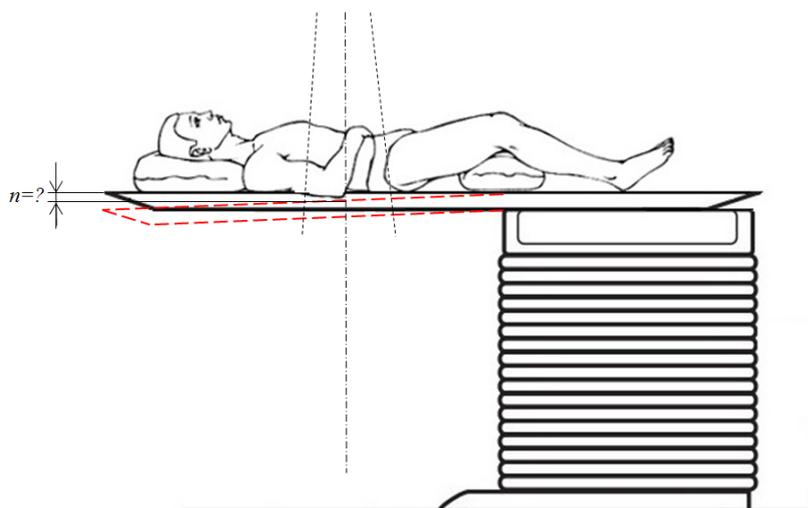


**Рис. 2.** РТС «Exact IGRT»:  $a$  – вперед;  $b$  – назад;  $c$  – вверх;  $d$  – вниз;  $e$  – влево/вправо<sup>2</sup>  
**Fig. 2.** Radiation therapy table “Exact IGRT”:  $a$  – in;  $b$  – out;  $c$  – up,  $d$  – down;  $e$  – to the left/ to the right<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Exact IGRT Couch Specification – Varian Medical Systems, Inc., 2007–2009, USA. P. 4.

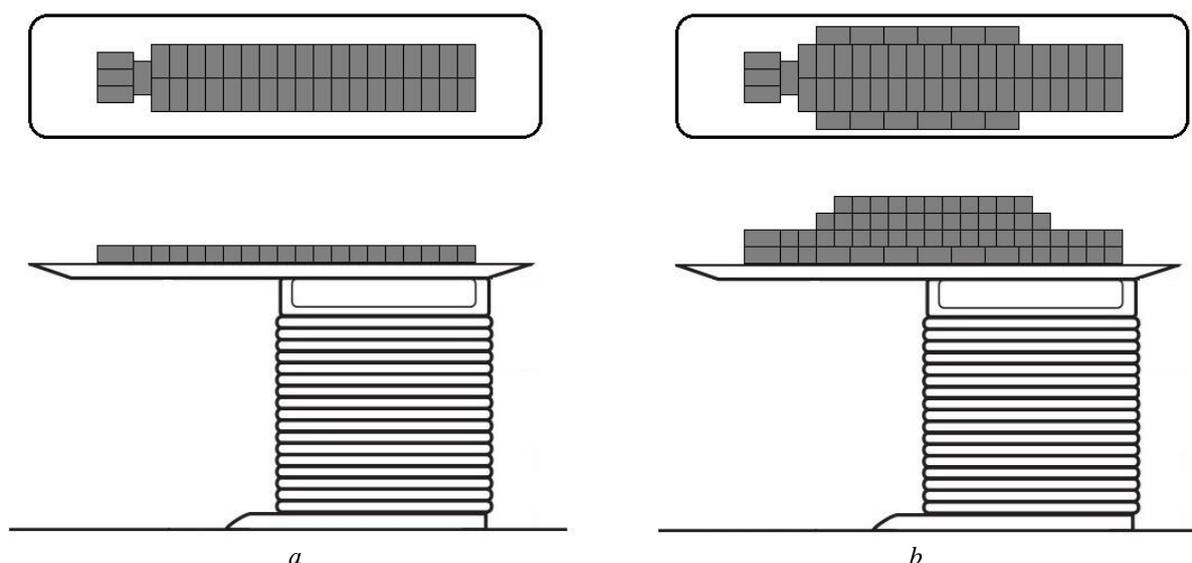
### Разработка модели тела человека

При облучении онкологических пациентов параметры их расположения на поверхности РТС выбираются индивидуально для каждого клинического случая с учетом характеристик плана лучевой терапии. Тем не менее установлено, что при изменении продольного положения РТС для пациентов, имеющих избыточный вес, имеет место отклонение ТП от горизонтального положения ( $n$ ) [5]. На рис. 3 показано положение пациента на РТС при облучении опухолей, расположенных в области малого таза. В таких случаях ТП выдвигается в крайнее продольное положение или близкое к нему.



**Рис. 3.** Отклонение ТП РТС от горизонтального положения при облучении опухолей малого таза ( $n$ )  
**Fig. 3.** Deviation of the radiation therapy tabletop from a horizontal position when irradiating pelvic tumors

Для проведения измерений отклонения ТП от горизонтального положения, авторами был разработан фантом, который представляет собой модель тела человека и состоит из пластиковых блоков прямоугольной формы массой 1 кг. Такая конструкция фантома предоставляет возможность изменять и распределять нагрузку на ТП РТС, что позволяет имитировать пациентов разного веса. Для проведения эксперимента авторами предложен фантом длиной 170 см (средний рост человека, проживающего в Республике Беларусь) [6] и массой от 40 до 180 кг (шаг изменения массы – 10 кг).



**Рис. 4.** Примеры распределения эталонных масс по ТП РТС:  
 $a$  – фантом массой 40 кг;  $b$  – фантом массой 140 кг

**Fig. 4.** Examples of the distribution of reference masses over the radiation therapy tabletop:  
 $a$  – phantom weighing 40 kg;  $b$  – phantom weighing 140 kg

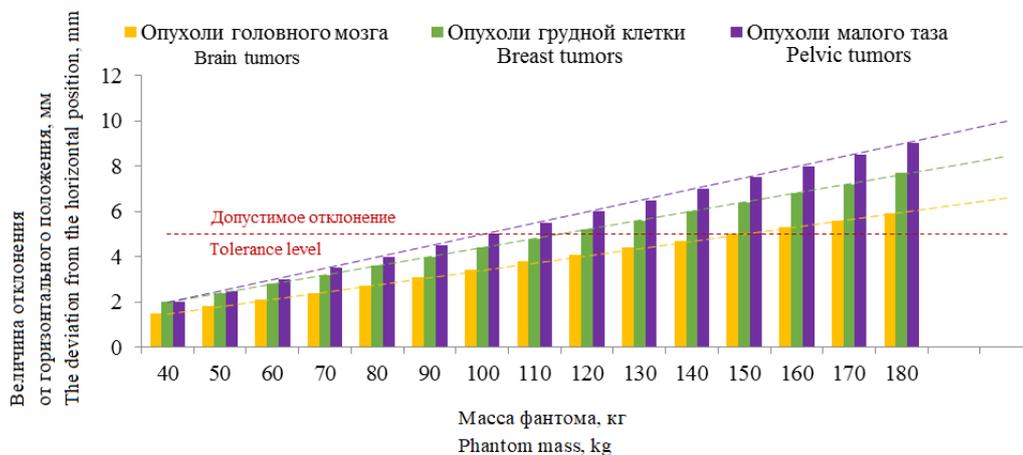
### Результаты и их обсуждение

На основании анализа более 300 клинических случаев пациентов, прошедших курс лучевой терапии в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова, авторами были установлены геометрические параметры всех осей перемещений РТС для фантома, симулирующего тело пациента и его типовое расположение для трех групп больных (опухоли головного мозга, опухоли грудной клетки и опухоли малого таза) при их облучении (табл. 1). С использованием полученных значений положения изоцентра мишени облучения проведены измерения отклонений в положении осуществления лучевой терапии пациента в изоцентре вращения и радиационного пучка ЛУЭ для двух РТС фирмы Varian «Exact IGRT» и «Exact couch». ТП РТС «Exact IGRT» сконструирована без использования опорных рельс, толщина ТП имеет значения от 5 до 7,5 см (изменяется по длине стола). ТП РТС «Exact couch» имеет постоянную толщину 2,2 см, усиление ТП реализовано с помощью опорных рельсов.

**Таблица 1.** Средние значения параметров РТС для опухолей головного мозга, грудной клетки и малого таза  
**Table 1.** Average Radiation therapy table parameters for tumors of the brain, chest, and pelvis

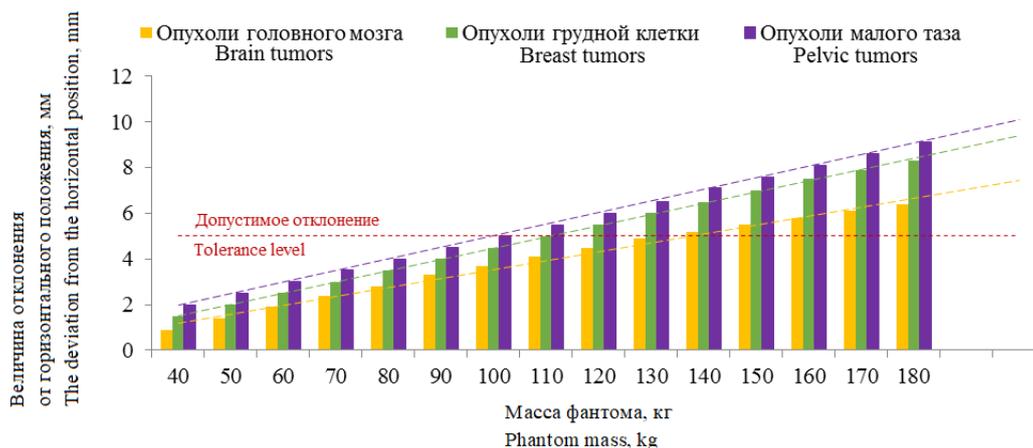
Параметр Parameters	Опухоли головного мозга Brain tumor	Опухоли грудной клетки Tumors of the chest	Опухоли малого таза Pelvic Tumors
Поперечное перемещение, см Lateral movement, cm	12,1±1,2	22,80±3,2	12,20±1,3
Продольное перемещение, см Longitudinal movement, cm	107,4±7,8	130,7±4,6	144,06±5,2
Вертикальное перемещение, мм Vertical movement, mm	995,2±2,7	990,60±1,5	998,40±0,8

В результате измерений была установлена практически линейная зависимость величины отклонения ТП РТС для обеих исследуемых поверхностей от веса тела пациента. В ходе анализа полученных данных выявлено, что наибольшее отклонение от горизонтального положения ТП возникает при позиции стола, определенной для опухолей малого таза, и достигает 9 мм при максимальной измеренной нагрузке 180 кг на РТС «Exact couch» и 8,5 мм на РТС «Exact IGRT». Превышение допустимого отклонения 5 мм установлено при нагрузке свыше 100 кг для обеих РТС. В положении ТП для опухолей грудной клетки максимальное отклонение составляет 8,2 и 7,8 мм при нагрузке 180 кг на РТС «Exact couch» и «Exact IGRT» соответственно. Превышение допустимого отклонения 5 мм выявлено при нагрузке свыше 110 кг для «Exact couch» и 117 кг для РТС «Exact IGRT». Наименьшее влияние на горизонтальность ТП оказывает нагрузка в положении для опухолей головного мозга и составляет 5,5 и 6,2 мм при массе фантома 180 кг. Превышение допустимого отклонения 5 мм наблюдалось при нагрузке свыше 150 и 160 кг для РТС «Exact IGRT» и «Exact couch» соответственно. Результаты измерений приведены на рис. 5, 6.



**Рис. 5.** Величина отклонения ТП РТС «Exact IGRT» от горизонтального положения в зависимости от нагрузки

**Fig. 5.** The deviation of the radiation therapy table “Exact couch” from the horizontal position depending on the load



**Рис. 6.** Величина отклонения ТП РТС «Exact couch» от горизонтального положения в зависимости от нагрузки

**Fig. 6.** The deviation of the radiation therapy table “Exact IGRT” from the horizontal position depending on the load

### Заключение

Результаты проведенного исследования показали, что при изменении продольного положения ТП РТС для пациентов, имеющих избыточный вес, имеют место отклонения ТП от горизонтального положения, значительно превышающие предельно допустимые уровни. В частности, данная величина составила 100 кг для обоих исследуемых РТС в положении типового лечения опухолей малого таза, 117 и 110 кг для РТС «Exact IGRT» и «Exact couch» соответственно в установленном положении для облучения опухолей грудной клетки и 150 и 160 кг для РТС «Exact IGRT» и «Exact couch» соответственно в положении для лучевой терапии опухолей головного мозга. Поскольку максимально допустимый вес пациента, согласно спецификации компании-производителя, составляет 200 и 220 кг соответственно и в связи с тем, что уже при массе пациента, которая значительно меньше данного значения, наблюдаются девиации горизонтального положения ТП более 5 мм для обоих исследуемых моделей терапевтических столов и всех трех рассматриваемых локализаций, что может повлиять на доставку предписанного трехмерного дозового распределения для целого ряда пациентов, авторы считают, что с целью коррекции возникающих ошибок в дозе и для недопущения некорректного облучения следует осуществлять учет отклонения ТП от горизонтального положения до начала лучевого лечения индивидуально в каждом клиническом случае. В связи с этим для проведения коррекции условий облучения пациента на этапе моделирования параметров его лечения и обеспечения требуемой протоколами ЛТ точности доставки индивидуальных дозовых распределений необходимо провести анализ зависимости отклонений в дозе, доставляемой пациентам, от величины отклонения ТП РТС от горизонтального положения для каждого используемого в клинической практике РТС, а также разработать и внедрить механизм, который позволит учитывать эту информацию при выборе параметров сеанса облучения и предписания дозы для любой локализации злокачественных новообразований. Для этого следует провести дополнительные исследования с целью выявления влияния систем предлучевой подготовки (компьютерных томографов, рентгеновских симуляторов) на ошибки в позиционировании пациентов.

### Список литературы

1. Океанов А.И. Моисеева П.И., Левина Л.Ф., Евмененко А.А., Ипатий Т.Б. Суконко О.Г. *Рак в Беларуси: цифры и факты. Анализ данных Белорусского канцер-регистра за 2009–2018 гг.* Минск: Национальная библиотека Беларуси; 2019.
2. Климанов В.А. *Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Ч. 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения.* Москва: НИЯУ МИФИ; 2011.

3. Tepper J., Foote R., Michalski J. *Clinical radiation oncology*. 5th Ed. Elsevier; 2020.
4. Тарутин И.Г., Титович Е.В. *Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии*. Минск: Беларуская навука; 2015.
5. Practical issues in treating heavy patients on a LINAC treatment couch. *Journal of applied clinical medical physics*. 2005;6(1):45-56.
6. Шаруха И.Н. Белорусы в антропологическом и этническом пространстве. *Псковский региональный журнал*. 2008;1:142-152.

### References

1. Oceanov A.I. Moiseeva P.I., Levina L.F., Evmenenko A.A., Ipatiy T.B., Sukonko O.G. [*Cancer in Belarus: figures and facts. Analysis of the data of the Belarusian Cancer Register for 2009–2018*]. Minsk: National Library of Belarus; 2019. (In Russ.)
2. Klimanov V.A. [*Radiobiological and dosimetric planning of radiation and radionuclide therapy. P. 1. Radiobiological basis of radiation therapy. Radiobiological and dosimetric planning of remote radiation therapy with braking and gamma radiation beams*]. Moscow: NRNU MEFPhI; 2011. (In Russ.)
3. Tepper J., Foote R., Michalski J. *Clinical radiation oncology*. 5th Ed. Elsevier; 2020.
4. Tarutin. I.G. [*The use of linear electron accelerators in high-tech radiation therapy*]. Minsk: Belaruskaya Navuka; 2015. (In Russ.)
5. Practical issues in treating heavy patients on a LINAC treatment couch. *Journal of applied clinical medical physics*. 2005;6(1):45-56.
6. Sharuho I.N. [Belarusians in the anthropological and ethnic space]. *Pskovskiy Regionalny Jurnal = Pskov Regional Journal*. 2008;1:142-152. (In Russ.)

### Вклад авторов

Петкевич М.Н. разработал модели «среднего» тела пациента, позволяющего изменять нагрузку на терапевтическую поверхность радиотерапевтических столов, выполнил анализ экспериментальных данных.

Титович Е.В. определил замысел исследования, выполнил установление геометрических параметров всех осей перемещений радиотерапевтических столов для фантома, симулирующего тело пациента и его типовое расположение для трех групп больных (опухоли головного мозга, опухоли грудной клетки и опухоли малого таза) при их облучении.

Бельков Г.В. экспериментально установил численные величины отклонения терапевтической поверхности в изоцентре радиационного поля от предписанного горизонтального положения при нагрузке на нее от 40 до 180 кг для радиотерапевтических столов, используемых в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова.

### Authors' contribution

Piatkevich M.N. developed the model of the patient's "average" body, which allows changing the load on the therapeutic surface of radiotherapy tables, analyzed the experimental data.

Titovich E.V. defined the concept of the research, established the geometric parameters of all axes of displacement of radiotherapy tables for the phantom simulation of a patient's body and its typical location for three groups of patients (brain tumors, chest tumors and pelvic tumors) during their irradiation.

Belkov G.V. experimentally established the numerical values of the therapeutic surface deviation in the radiation field isocenter from the prescribed horizontal position with a load on it from 40 to 180 kg for radiotherapy tables used in the N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus.

**Сведения об авторах**

Петкевич М.Н., аспирант МГЭИ им. А.Д. Сахарова  
Белорусского государственного университета.

Титович Е.В., к.т.н., доцент, медицинский физик  
УП «АДАНИ».

Бельков Г.В., студент МГЭИ им. А.Д. Сахарова  
Белорусского государственного университета.

**Адрес для корреспонденции**

220070, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Долгобродская, 23/1,  
МГЭИ им. А.Д. Сахарова Белорусского  
государственного университета  
тел. +375-29-577-09-75;  
e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com  
Петкевич Максим Николаевич

**Information about the authors**

Petkevich M.N., PG Student of the A.D. Sakharov  
ISEI of Belarusian State University.

Titovich E.V., PhD, Associate Professor, Medical  
Physicist of the unitary enterprise "ADANI".

Belkov G.V., student of the A.D. Sakharov ISEI  
of Belarusian State University.

**Address for correspondence**

220070, Republic of Belarus,  
Minsk, Dolgobrodskaya str., 23/1,  
A.D. Sakharov ISEI of Belarusian  
State University  
tel. +375-29-577-09-75;  
e-mail: MaxPetkevichN@gmail.com  
Piatkevich Maksim Nikolaevich